

# Integrierte Navigationssysteme

---

Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation

---

von  
Jan Wendel

---

Oldenbourg Verlag München Wien

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Lineare Systeme</b>	<b>5</b>
2.1	Zustandsraumdarstellung linearer Systeme .....	7
2.2	Eigenwerte und Eigenvektoren .....	9
2.3	Lineare Systeme im Zeitdiskreten .....	15
2.4	Nichtlinearitäten .....	24
<b>3</b>	<b>Inertiale Navigation</b>	<b>27</b>
3.1	Koordinatensysteme .....	28
3.1.1	Das Erdmodell WGS-84 .....	30
3.1.2	Transformationen .....	31
3.1.3	Nomenklatur .....	33
3.2	Lagedarstellungen .....	36
3.2.1	Eulerwinkel .....	37
3.2.2	Orientierungsvektor und Quaternion .....	38
3.2.3	Richtungskosinusmatrix .....	43
3.3	Strapdown-Rechnung .....	45
3.3.1	Lage .....	45
3.3.2	Geschwindigkeit .....	52
3.3.3	Position .....	60
3.4	Fehlercharakteristik eines Inertialnavigationssystems .....	60
3.4.1	Drehratensensoren .....	61
3.4.2	Beschleunigungsmesser .....	65
3.4.3	Generische Inertialsensorfehlermodelle .....	67
3.4.4	Kurzzeitcharakteristik .....	73
3.4.5	Langzeitcharakteristik .....	75
3.5	Initialisierung .....	78
<b>4</b>	<b>Satellitenavigation</b>	<b>83</b>
4.1	Systemüberblick Navstar GPS .....	83
4.2	Funktionsprinzip eines GPS-Empfängers .....	85
4.2.1	GPS-Signalstruktur .....	86

4.2.2	Akquisition .....	92
4.2.3	Tracking .....	94
4.3	GPS-Beobachtungsgrößen .....	99
4.3.1	Pseudorange .....	100
4.3.2	Trägerphasenmessung .....	104
4.3.3	Deltarange .....	106
4.3.4	Fehlerquellen .....	108
4.3.5	Differential GPS .....	109
4.4	Modernisierung des GPS-Systems .....	110
4.5	Galileo Systemüberblick .....	111
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Stochastik</b> .....	<b>117</b>
5.1	Die Zufallsvariable .....	117
5.1.1	Wahrscheinlichkeitsdichte .....	117
5.1.2	Gaußverteilung .....	120
5.2	Stochastische Prozesse .....	123
5.2.1	Weißes Rauschen .....	124
5.2.2	Zeitkorreliertes Rauschen .....	125
<b>6</b>	<b>Das Kalman-Filter</b> .....	<b>129</b>
6.1	Kalman-Filter Gleichungen .....	130
6.1.1	Herleitung über normalverteilte Zufallsvektoren .....	130
6.1.2	Herleitung über Minimierung einer Kostenfunktion .....	134
6.1.3	Diskussion der Filtergleichungen .....	137
6.2	Beobachtbarkeit .....	140
6.3	Übergang kontinuierlich – diskret .....	141
6.4	Nichtlineare System- und Messmodelle .....	143
6.4.1	Linearisiertes Kalman-Filter .....	144
6.4.2	Erweitertes Kalman-Filter .....	146
6.4.3	Sigma-Point-Kalman-Filter .....	147
6.4.4	Kalman-Filter 2. Ordnung .....	156
6.5	Filterung bei zeitkorreliertem Rauschen .....	157
6.5.1	Erweiterung des Zustandsvektors .....	158
6.5.2	Messwertdifferenzen .....	159
6.6	Covariance Intersection .....	160
6.6.1	Bekannte Kreuzkorrelationen .....	161
6.6.2	Unbekannte Kreuzkorrelationen .....	163
6.7	Adaptive Filterung .....	167
6.7.1	Interacting Multiple Model Filter: Problemformulierung .....	168
6.7.2	Herleitung der IMM-Filtergleichungen .....	169

<b>7</b>	<b>Monte-Carlo-Methoden</b>	<b>179</b>
7.1	Chapman-Kolmogorov-Gleichung .....	179
7.2	Berücksichtigung von Beobachtungen .....	181
7.3	Partikelfilter .....	182
7.3.1	Repräsentation der WDF .....	182
7.3.2	Propagationsschritt .....	183
7.3.3	Estimationsschritt .....	183
7.3.4	Resampling .....	184
7.3.5	Simulationsergebnisse .....	186
<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiel GPS/INS-Integration</b>	<b>191</b>
8.1	GPS/INS-Integrationsstrategien .....	192
8.1.1	Loosely Coupled System .....	192
8.1.2	Tightly Coupled System .....	193
8.1.3	Ultra-Tight und Deep Integration .....	193
8.2	Entwurf eines Navigationsfilters .....	194
8.2.1	Systemmodell .....	194
8.2.2	Messmodelle .....	206
8.2.3	Korrektur der totalen Größen .....	214
8.2.4	Vergleich von Loosely Coupled und Tightly Coupled Systemen .....	215
8.3	Nutzung von Trägerphasenmessungen .....	219
8.3.1	Carrier Aided Smoothing .....	220
8.3.2	Festlegung der Trägerphasenmehrdeutigkeitswerte .....	221
8.3.3	Zeitlich differenzierte Trägerphasenmessungen .....	224
8.4	Verzögerte Verfügbarkeit von Messwerten .....	231
8.5	Integrity Monitoring .....	238
8.6	Sigma-Point-Kalman-Filter .....	239
8.6.1	Nichtlinearität eines Schätzproblems .....	240
8.6.2	Simulationsergebnisse .....	243
8.6.3	Theoretischer Vergleich mit Objektverfolgung .....	252
8.7	Fixed-Interval Smoother .....	254
8.7.1	Gleichungen des RTS Smoothers .....	254
8.7.2	Simulationsergebnisse .....	256
<b>9</b>	<b>Anwendungsbeispiel Transfer Alignment</b>	<b>259</b>
9.1	Konventionelle Transfer-Alignment-Verfahren .....	259
9.2	Rapid Transfer Alignment .....	260
9.3	Effiziente Berücksichtigung von Zeitkorrelationen .....	263
9.3.1	Propagationsschritt .....	265
9.3.2	Messwertverarbeitung .....	266

9.3.3	Diskussion der Filtergleichungen .....	267
9.4	Numerische Simulation .....	268
9.4.1	Erzeugung von Inertialsensordaten .....	269
9.4.2	Ergebnisse .....	270
9.5	Adaptive Schätzung der Rauschprozessmodelle .....	274
9.5.1	Identifikation anhand von Messwertdifferenzen .....	275
9.5.2	Ergebnisse .....	278
<b>10</b>	<b>Anwendungsbeispiel unbemanntes Fluggerät</b>	<b>281</b>
10.1	Beobachtbarkeit des Yaw-Winkels .....	283
10.1.1	Stützung mit Erdmagnetfeldmessungen .....	285
10.2	Stabilisierung bei GPS-Ausfall .....	287
10.2.1	Systemmodell des Lagefilters .....	288
10.2.2	Stützung mit Beschleunigungsmessungen .....	288
10.3	Systemsimulation .....	289
10.3.1	Funktionsprinzip des Fluggeräts .....	290
10.3.2	Mathematisches Modell .....	292
10.3.3	Einfluss der Trajektorien-dynamik .....	296
10.3.4	Schätzung von Modellparametern .....	297
10.3.5	Ergebnisse der Gesamtsystemsimulation .....	299
10.4	Experimentelle Verifikation .....	302
10.4.1	Kalibration der Beschleunigungsmesser .....	304
10.4.2	Ergebnisse .....	305
<b>A</b>	<b>Sherman-Morrison-Woodbury-Formel</b>	<b>309</b>
<b>B</b>	<b>Differentiation von Spuren von Matrizen</b>	<b>313</b>
<b>C</b>	<b>MATLAB-Code zum Beispiel Abschnitt 7.3.5</b>	<b>315</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>319</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>325</b>
	<b>Index</b>	<b>335</b>